

УДК 539.3/6:669.055(075.8)

Н. Н. Ситников^{1,2*}, А. В. Шеляков², И. А. Хабибуллина¹, Г. В. Сивцова¹

¹ Исследовательский центр имени М. В. Келдыша, г. Москва

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

* *sitnikov_nikolay@mail.ru*

СЛОИСТЫЕ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{25}\text{Cu}_{25}$ С ОБРАТИМЫМ ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Сплавы, обладающие эффектом памяти формы, являются перспективными материалами для создания приводов различных устройств. Для миниатюризации таких устройств, создания микро- и, возможно, наноустройств является актуальным получение тонкомерных материалов с эффектом обратимой памяти формы (ЭОПФ). Данная работа посвящена исследованию свойств быстрозакаленных аморфно-кристаллических тонких лент из сплава системы TiNi-TiCu , обладающих ЭОПФ.

Ключевые слова: обратимый эффект памяти формы, аморфное состояние, кристаллическое состояние, сверхбыстрая закалка, композит

N. N. Sitnikov, A. V. Shelyakov, I. A. Khabibullina, G. V. Sivtsova

LAMINATED AMORPHOUS-CRYSTALLINE RAPID QUENCHED RIBBONS OF $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{25}\text{Cu}_{25}$ ALLOY WITH TWO-WAY SHAPE MEMORY EFFECT

Alloys with shape memory effect are promising materials for the creation actuators of various devices. For the miniaturization of devices it becomes relevant to obtain thin-dimensional materials with the effect of two-way shape memory (TWSME). This work is devoted to the study of the properties of rapid-quenched amorphous-crystalline thin ribbons from the TiNi-TiCu alloy system, possessing TWSME.

Key words: two-way shape memory effect, amorphous state, crystalline state, rapid quenching, composites

В качестве объекта исследования был выбран сплав квазибинарной системы TiNi-TiCu с 25 ат. % Cu, полученный методом сверх-

быстрой закалки из расплава (метод спиннингования расплава). Заготовки сплава расплавлялись в кварцевом тигле в атмосфере гелия и экструдировались через сопло в тигле на поверхность вращающегося медного диска. В результате этого процесса, происходящего со скоростью охлаждения расплава $10^5 \dots 10^6$ К/с, получали тонкие ленты толщиной 30...50 мкм и шириной от 1 до 2 мм в аморфно-кристаллическом состоянии.

В зависимости от скорости охлаждения расплава, определяемой технологическими параметрами процесса закалки, в лентах формируется аморфное, кристаллическое или аморфно-кристаллическое состояние [1; 2]. При скоростях охлаждения расплава 10^6 К/с и выше весь объем ленты из сплава $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{25}\text{Cu}_{25}$ находится в аморфном состоянии, а при скоростях охлаждения расплава 10^5 К/с и ниже лента имеет кристаллическую структуру. При промежуточных значениях скорости охлаждения расплава ($10^5 \dots 10^6$ К/с) может происходить кристаллизация в объеме аморфной матрицы. При равномерном отводе тепла и соблюдении оптимальных технологических параметров спиннингования на неконтактной поверхности ленты образуется тонкий слой кристаллической фазы и формируется аморфно-кристаллическая лента с резкой границей, разделяющей аморфное и кристаллическое состояния на слои, т. е. лента представляет собой слоистый структурный композит (рис. 1) [1].



Рис. 1. РЭМ-изображения типичного поперечного сечения слоистого быстрозакаленного аморфно-кристаллического композита из сплава $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{25}\text{Cu}_{25}$

За счет изменения скорости охлаждения расплава возможно варьирование соотношения толщин аморфного и кристаллического слоев. В частности, снижение скорости охлаждения от $8,9 \cdot 10^5$ до $4,2 \cdot 10^5$ К/с приводит к увеличению толщины кристаллического слоя от 2 до 12,5 мкм (рис. 2, а–е). При этом во всех образцах быстрозакаленных слоистых аморфно-кристаллических композитов наблюдается ЭОПФ с деформацией изгибом без дополнительной термомеханической обработки. Данный эффект заключается в следующем — в ис-

ходном состоянии при комнатной температуре образец имеет прямолинейную форму (рис. 2, *ж*); при нагреве выше температуры A_n он начинает изгибаться и при температуре выше A_k (A_n , A_k — температуры начала и конца обратного мартенситного превращения для сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$) принимает форму близкую к кольцу. Например, для образца со средними значениями толщин кристаллического и аморфного слоев 10 мкм и 30 мкм соответственно, диаметр кольца составляет около 16 мм. Охлаждение образца до температуры ниже M_k приводит к его возврату в исходное прямолинейное состояние. В дальнейшем данный эффект повторяется в цикле нагрев — охлаждение [2].

Для более детальных исследований быстрозакаленной слоистой аморфно-кристаллической ленты был выбран образец с общей толщиной около 40 мкм и толщиной кристаллического слоя 10 мкм. В совокупности были проведены следующие исследования: оптическая, просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом; рентгеноструктурный анализ; измерение микротвердости; дифференциальная сканирующая калориметрия; измерения температурной зависимости формоизменения при реализации ЭОПФ; оценено быстродействие и количество циклов реализации ЭОПФ и др.

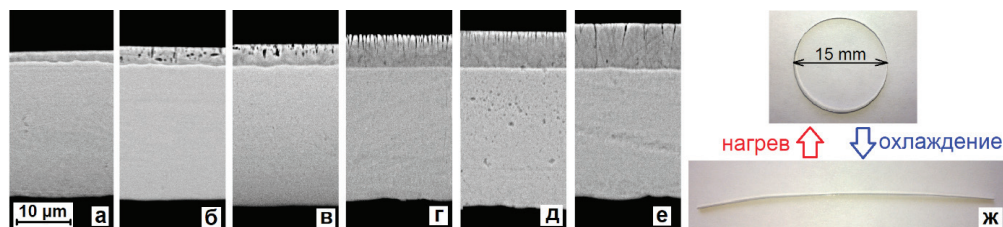


Рис. 2. СЭМ-изображения поперечного сечения слоистых аморфно-кристаллических лент из сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$, полученных при разных скоростях охлаждения расплава: от $8,9 \cdot 10^5$ (а) до $4,2 \cdot 10^5$ К/с (е). Проявление ЭОПФ (ж)

На основе полученных экспериментальных данных предложена качественная структурная модель материала, которая корректно описывает механическое поведение быстрозакаленного аморфно-кристаллического ленточного композита [1]. Способность разработанного аморфно-кристаллического композита к обратимой изгибной деформации была использована для создания приводных элементов с ЭОПФ

на изгиб для микромеханических устройств различного назначения. В частности, были разработаны и изготовлены макеты микропинцетов для задач захвата разнородных субмикро- и микрообъектов [3].

Работа выполнена по гранту при финансовой поддержке РНФ, проект № 19-72-00145.

Литература

1. Формирование обратимого эффекта памяти формы в сплаве TiNiCu методом спиннингования / А. В. Шеляков [и др.] // Известия РАН. Серия физическая 2015. Т. 79, № 9. С. 1281–1287.
2. Sitnikov N. N. Shape memory effect in a rapidly quenched $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{25}\text{Cu}_{25}$ alloy / N. N. Sitnikov, A. V. Shelyakov, I. A. Khabibullina // Russian Metallurgy (Metallurgy). 2017. № 10. P. 794–800.
3. Development of micromechanical device on the base of two-way shape memory alloy ribbon / A. Shelyakov [et al.] // Acta Physica Polonica. 2018. V. 134, № 3. P. 708–7013.